

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиров И.С. Развитие теории и практики разработки нефтяных месторождений. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. — 356 с.
2. Мангазеев В.П., Белозёров В.Б., Кошовкин И.Н., Рязанов А.В. Методика отображения в цифровой геологической модели литолого-фациальных особенностей терригенного коллектора // Нефтяное хозяйство. — 2006. — № 5. — С. 66–70.
3. Amaefule J.O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G., Keelan D.K. Enhanced Reservoir Description: Using core and log data to identify Hydraulic (Flow) Units and predict permeability in uncored intervals/wells // SPE 26436: 68<sup>th</sup> Ann. Tech. Conf. and Exhibit. — Houston, Tx, 1993. — P. 205–220.
4. Corbett P.W.M., Ellabadi Y., Mohammed K., Posysoev A. Global Hydraulic Elements: Elementary Petrophysics for Reduced Reservoir Modeling // EAGE 65<sup>th</sup> Conference & Exhibition. — Stavanger, Norway, 2–5 June 2003. — Z-99.
5. Корбетт П., Дятлов А., Кулагина Т., Посысов А., Вестерман Р., Жег С., Абабков К. Новые подходы к описанию пластов на сибирских нефтяных месторождениях (на примере Крапивинского и Малобалыкского месторождений) // Интенсификация добычи нефти: Матер. Междунар. научно-практ. конф. — Томск, 2004. — С. 49–56.
6. Duboz P., Lafet Y., Mougnot D. Moving to a layered impedance cube: advantages of 3D stratigraphic inversion // First break. — 1998. — V. 16. — № 9. — P. 311–318.
7. Белозёров В.Б., Разин А.В. Сейсмогеологическая интерпретация данных 3D-сейсморазведки на месторождениях нефти и газа (на примере Крапивинского месторождения) // Интенсификация добычи нефти: Матер. Междунар. научно-практ. конф. — Томск, 2004. — С. 97–103.
8. Мангазеев В.П., Белозёров В.Б., Кошовкин И.Н., Рязанов А.В. Технология построения геологической модели терригенного коллектора нефтяных и газовых месторождений // Вестник РАЕН (ЗСО). — 2005. — № 7. — С. 196–210.

Поступила 22.11.2006 г.

УДК 551.242

## ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫХ СРЕД ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.В. Астафуров, Е.В. Шилько, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск  
E-mail: astaf@usgroups.com

*На основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов проведено теоретическое изучение условий инициирования относительных смещений по границам раздела блоков геосреды, находящейся в сложном напряженном состоянии, при локальных вибрационных воздействиях. Показано, что определяющими факторами при формировании неустойчивой подвижки по межблочной границе разломно-блоковых геологических сред являются относительная величина сдвиговых напряжений, а также частота вибрационного воздействия, т. е. времени выделения энергии импульса. Слабые по мощности, но продолжительные по времени воздействия на высоконапряженные границы раздела являются наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат.*

### Введение

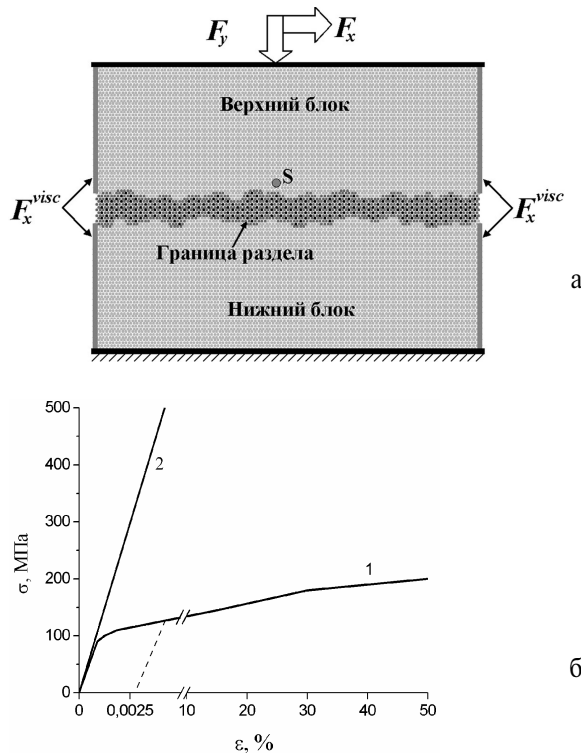
Известно, что геологические среды обладают иерархической многоуровневой организацией их блочной структуры [1]. Любой участок земной коры представляет собой совокупность структурных элементов, разделенных нарушениями сплошности разного масштаба. Границы раздела блоков имеют более низкие прочностные и деформационные характеристики, чем материал самих блоков. Поэтому нарушения сплошности различного масштаба являются одним из способов существования горного массива при больших необратимых деформациях [2]. Механизмы реализации упругой энергии геосреды, находящейся в сложном напряженном состоянии, могут быть различными [3]. Среди них основным является локализация необратимых деформаций на границах раздела блоков земной коры. Режим и скорости относительных смещений блоков по активным разломам определяются особенностями структуры и локального напряженного состояния, а также внешними природными и тех-

ногенными факторами [4, 5]. Значения скорости смещений могут варьироваться от нескольких мм/год (криповый режим) до первых м/с при сильных землетрясениях. Одним из механизмов землетрясений является относительное сдвиговое перемещение блоков. Его реализация связана с достижением предельного значения сдвиговых напряжений на границе раздела. Поэтому актуальной задачей геофизики является определение условий инициации неустойчивых подвижек по активным границам раздела земной коры.

В настоящей работе на основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов (ПКА) [6] проведено исследование условий инициации динамического проскальзывания блоков по границе раздела, находящейся в сложном напряженном состоянии, при вибрационных воздействиях. Отметим, что на протяжении уже ряда лет метод ПКА успешно используется для изучения особенностей отклика сложных гетерогенных материалов и сред [7, 8].

### Постановка задачи численного моделирования

Для решения поставленных задач в работе на основе метода ПКА была разработана качественная двумерная модель границы раздела структурных элементов блочной среды, рис. 1, а. Модельный образец состоял из двух высокопрочных блоков, разделенных интерфейсной областью, для которой задавались механические свойства катаклазированного вещества. Функции отклика автоматов блоков и границы раздела показаны на рис. 1, б. Видно, что для автоматов блоков задавалась линейная функция отклика, а для границы раздела функция отклика имела длинный необратимый участок. Нарушения сплошности в интерфейсной области, размер которых значительно меньше размера клеточного автомата, моделировались неявно, через функцию отклика (кривая 2 на рис. 1, б). Нарушения большего масштаба моделировались заданием несвязанных пар клеточных автоматов в материале границы раздела.



**Рис. 1.** Структура и схема нагружения модельной границы раздела (а), функции отклика автоматов блоков (кривая 1) и материала границы раздела (кривая 2) (б). Пунктирная линия соответствует разгрузке

В проведенных расчетах нижняя поверхность модельного образца закреплялась, а нагрузки прикладывались к верхней поверхности, рис. 1, а. Важно отметить, что геологические среды находятся в стесненных условиях, ограничивающих объемные деформации блоков, и свободу их относительного перемещения по границам раздела. В работе рассматривалась пара элементов среды, влияние окружения которых сводилось к увеличению инерционности движения, а также к интенсивному по-

глощению энергии механического нагружения. Для имитации этих свойств окружения на автоматы боковых поверхностей блоков действовала дополнительная вязкая сила, направленная по оси  $X$ ,  $F_x^{visc} = -\alpha V_x$ , где  $V_x$  – горизонтальная компонента скорости соответствующего автомата.

В работах [8, 9] показано, что влияние вибрационных воздействий существенно, когда уровень напряжений на границах раздела близок к интегральному значению предела текучести. Поэтому в работе рассматривались предварительно нагруженные образцы. Исходное напряженное состояние задавалось приложением к верхней поверхности образца внешней силы, имеющей нормальную ( $F_y$ ) и тангенциальную ( $F_x$ ) компоненты (рис. 1, а). Значение  $F_y$  было фиксированным, и его удельное значение составляло 20 % от предела текучести материала границы. При вибрационном нагружении важную роль играют собственные частоты, связанные с распространением продольной и поперечной упругих волн по образцу [8]. Для данной системы (рис. 1) они заключены между значениями  $v_L^1$  и  $v_H^1$ , соответствующими распространению поперечных и продольных упругих волн по длине  $L$  и высоте  $H$  образца.

Важным критерием оценки сейсмоопасности напряженного состояния фрагментов геосреды является «устойчивость» текущего состояния активных границ раздела к вибрационным воздействиям. Для изучения влияния вибраций в работе проведены следующие расчеты. После задания исходного напряженного состояния границы раздела (рис. 1) на систему оказывалось локальное вибрационное воздействие, в качестве источника которого использовался автомат S верхнего блока, находящийся вблизи границы раздела, рис. 1, а. Циклическое нагружение задавалось следующим образом. Во всех парах автомата S с соседями помимо «классических» потенциальных и вязких сил взаимодействия [6] действовала дополнительная периодически изменяющаяся нормальная сила отталкивания (рис. 2):

$$F_{rep}^{ij} = \begin{cases} S^{ij} P_{\max} \sin(2\pi v(t - t_{\text{start}})), & (n-1)/v < (t - t_{\text{start}}) < (n-1/2)/v \\ 0, & (n-1/2)/v < (t - t_{\text{start}}) < n/v \end{cases},$$

где  $S^{ij}$  – площадь контакта пары автоматов,  $v$  – частота,  $t_{\text{start}}$  – время начала циклического нагружения,  $t$  – текущий момент времени,  $P_{\max}$  – амплитуда изменения «вибрационного» давления,  $n$  – номер цикла.

На рис. 3 приведена зависимость силы сопротивления образца  $F^{resist}$  сдвиговому деформированию с постоянной скоростью от величины тангенциального смещения  $l_{sh}$ . На графике переменные  $F^{resist}$  и  $l_{sh}$  нормированы соответственно на максимальную силу сопротивления  $F_{\max}^{resist}$  и толщину границы  $h_{inf}$ . Видно, что кривая сопротивления сдвигу характеризуется тремя основными стадиями: квазиупругой, квазипластического течения и предельной (участки разупрочнения и остаточной прочности).

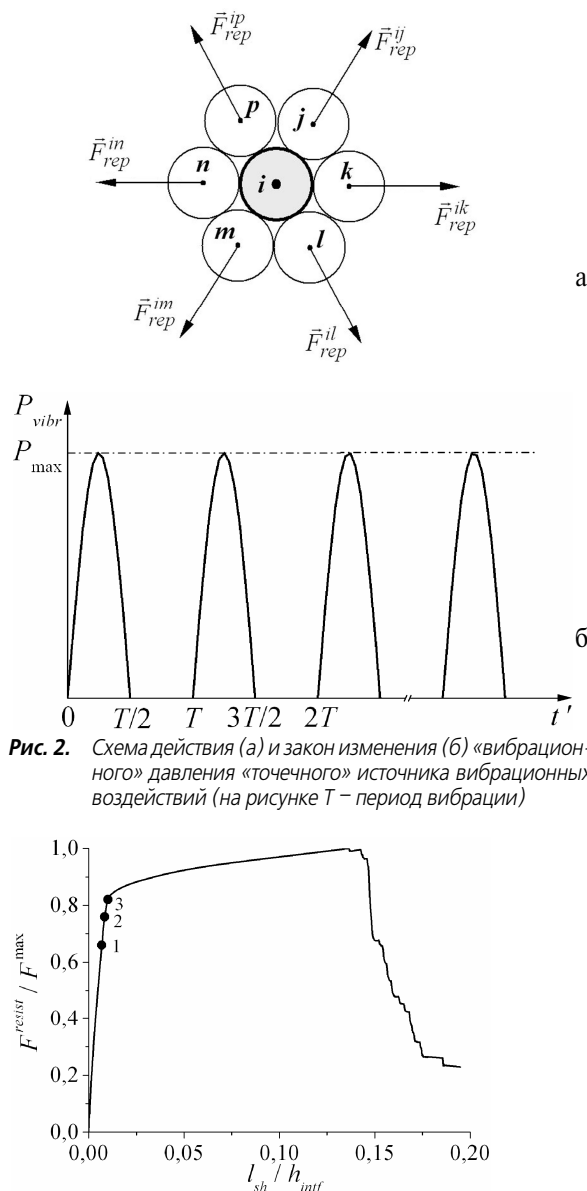


Рис. 2. Схема действия (а) и закон изменения (б) «вибрационного» давления «точечного» источника вибрационных воздействий (на рисунке  $T$  – период вибрации)

Рис. 3. Зависимость силы сопротивления тангенциальному смещению активного крыла модельного разлома  $F^{\text{resist}}/F^{\text{max}}$  от величины смещения  $l_{sh}/h_{inf}$ . Точки на диаграмме отмечают выделенные уровни напряжений  $F^{\text{resist}}/F^{\text{max}}$ : 1) 0,66; 2) 0,76; 3) 0,82

Зачастую геосреды функционируют в условиях постоянного воздействия вибраций различной природы. Постепенное накопление малых необратимых деформаций на наиболее нагруженных межблочных границах (в конце квазиупругой и в начале квазипластической стадий на рис. 3) может приводить к возникновению динамического проскальзывания блоков. Отметим, что влияние слабых возмущений на геодинамические процессы (в том числе подготовку землетрясений) является одной из наиболее дискутируемых проблем в геофизике [10]. Поэтому в работе проведено исследование особенностей инициирования неустойчивой подвижки по границе раздела блоков при циклических воздействиях с контролируемыми параметрами (частота  $\nu$

и амплитуда  $P_{\text{max}}$ ). Рассматривались границы раздела, находящиеся в различных напряженных состояниях, показанных на рис. 3 точками 1–3.

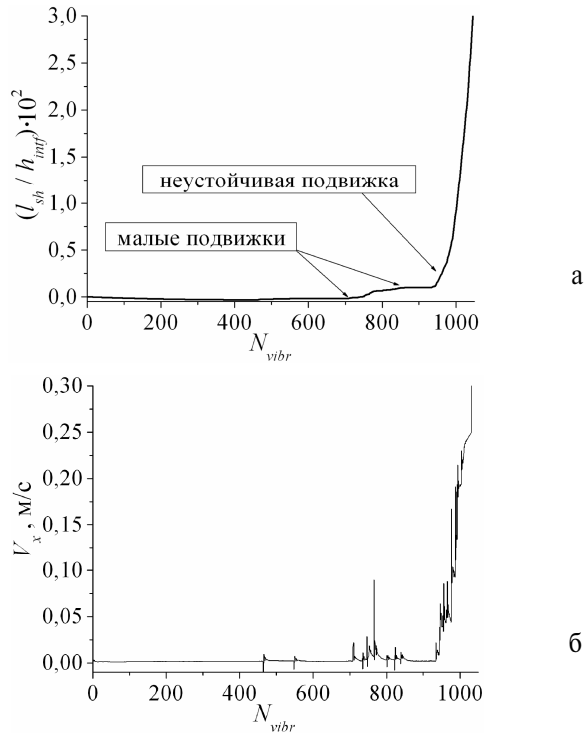
#### Закономерности формирования неустойчивой подвижки при локальных вибрационных воздействиях

Результаты расчетов показывают, что локальное вибрационное воздействие приводит к накоплению необратимых деформаций на границе раздела и генерации повреждений. Так как напряженное состояние интерфейсной зоны определяется действием сил со стороны структурных блоков, то с накоплением повреждений эти силы начинают превосходить силу сдвигового сопротивления границы раздела. При этом верхний блок начинает смещаться в направлении, определяемом силой  $F_x$ , до тех пор, пока из-за упрочнения материала границы сила  $F^{\text{resist}}$  не станет равной  $F_x$ , а действие окружения не приведет к остановке. Такое смещение можно рассматривать как малую устойчивую подвижку. Дальнейшее воздействие приводит к возникновению новых повреждений и подвижек. Такие подвижки дополнительно ускоряют процесс накопления деформаций на границе раздела. С увеличением числа повреждений возрастает величина и скорость смещений верхнего блока. На определенной стадии эффективная сдвиговая прочность границы раздела становится ниже удельного значения приложенной силы, что приводит к безостановочному движению верхнего блока с ускорением, что может быть ассоциировано с неустойчивой подвижкой.

Зависимости величин смещения блока по границе  $l_{sh}$  и мгновенной скорости смещения  $V_x$  от количества циклов вибрации  $N_{\text{vibr}}$  приведены на рис. 4. Видно, что с некоторого момента верхний блок начинает совершать небольшие смещения по границе раздела, рис. 4, а. Постепенно амплитуда подвижек возрастает, а временные интервалы между ними уменьшаются и становятся сопоставимыми с длительностью самих подвижек. На определенном этапе очередная подвижка становится безостановочной, и происходит динамическое проскальзывание, рис. 4, а. Анализ временной зависимости скорости верхнего блока показывает, что при крайне низкой средней скорости инициируемого вибрациями смещения ( $V_x \sim 1,6 \cdot 10^{-30}$  м/с) с участками подвижек связаны «всплески» скорости, амплитуда которых возрастает с увеличением амплитуды подвижек и на поздних этапах нагружения достигает 10 см/с, рис. 4, б. На стадии неустойчивой подвижки происходит безостановочный рост скорости.

Можно провести аналогию между «всплесками» скорости движения верхнего блока (рис. 4, б) и сейсмическими волнами, излучаемыми очагами землетрясений. Если рассматривать подвижки по границе как аналоги сейсмических событий, то весь процесс циклического нагружения представляет собой заключительные стадии подготовки землетрясения. Очевидно, что малые «устойчивые» по-

движки отвечают форшокам, а динамическое проскальзывание верхнего блока — основному событию. Как видно из рис. 4, между окончанием последнего «форшока» и началом основного события имеется продолжительный временной интервал (около 10 % от полного времени «подготовки землетрясения»), в течение которого неустойчивые подвижки отсутствуют. Этот эффект в некотором отношении аналогичен явлению сейсмического затишья, которое нередко имеет место перед крупными землетрясениями [11]. В частности, длительное сейсмическое затишье продолжительностью около 40 лет выявлено перед Чуйским (Алтайским) землетрясением 27 сентября 2003 г. [12]. Низкая сейсмичность высоконапряженных областей среды объясняется действием мощных диссипативных процессов, а также различных механизмов упрочнения [3]. Истощение их ресурсов приводит к хрупкому разрушению. Продолжительность участка «затишья» зависит от параметров вибрационного воздействия ( $\nu$  и  $P_{\max}$ ) и близости напряженного состояния границы раздела к предельному значению.

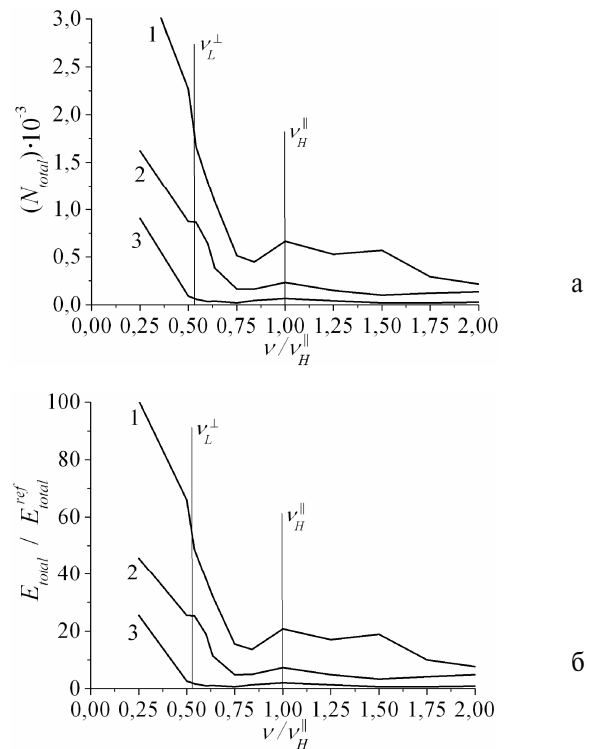


**Рис. 4.** Зависимость величины тангенциального смещения  $l_{sh}/h_{intf}$  (а) и тангенциальной компоненты скорости движения верхнего блока  $V_x$  (б) от количества циклов локального вибрационного воздействия при  $F_x/P_{\max}=0,66$ ,  $\nu=2 \cdot \nu_H^{\parallel}$ ,  $P_{\max}=122,5$  МПа

#### Анализ «эффективности» локальных вибрационных воздействий для инициирования подвижек по активным границам раздела

Как показано выше, локальные вибрационные воздействия могут приводить к возникновению неустойчивых подвижек. В работе проведен анализ «эффективности» таких воздействий, оцениваемой

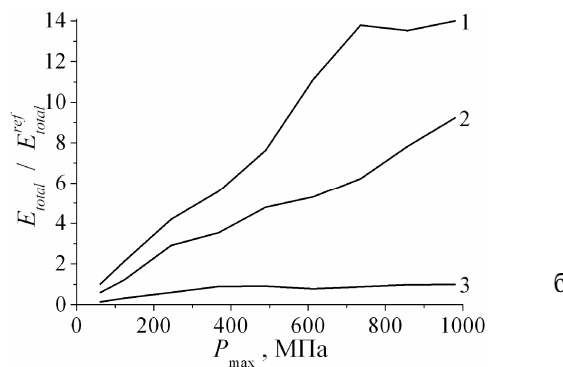
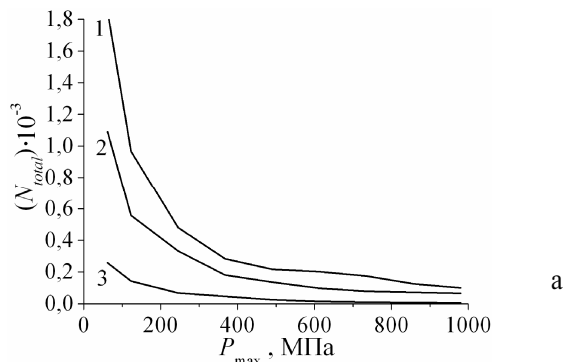
через количество циклов  $N_{total}$  и полную энергию вибраций  $E_{total}$ , необходимых для инициации динамического проскальзывания блоков. На рис. 5 приведены частотные зависимости  $N_{total}$  и  $E_{total}$  для трех выделенных на рис. 3 напряженных состояний. Значения частоты вибрационного воздействия  $\nu$  отнесены к максимальной собственной частоте образца ( $\nu_H^{\parallel}$ ). Значения энергии — к величине  $E_{total}^{ref}$ , соответствующей задаче со следующими условиями нагружения:  $F_x=0,82 \cdot F_{\max}$ ,  $\nu=2 \cdot \nu_H^{\parallel}$ ,  $P_{\max}=980$  МПа. Видно, что при  $\nu < \nu_L^{\perp}$  величина  $N_{total}$  быстро убывает с ростом частоты. В области собственных частот  $N_{total}$  выходит на некоторый уровень и при дальнейшем увеличении  $\nu$  практически не меняется, рис. 5, а. Энергия одного цикла вибрации  $E_{cycle}$  слабо зависит от частоты, поэтому зависимости  $E_{total}(\nu)$  повторяют кривые  $N_{total}(\nu)$ , рис. 5, б. Таким образом, при локальных вибрационных воздействиях на нагруженную границу раздела с частотами, сопоставимыми или превышающими собственные для исследуемого фрагмента среды, количество энергии, затрачиваемой для инициирования неустойчивой подвижки, определяется, главным образом, относительной величиной сдвиговых напряжений ( $F_x/F_{\max}$ ).



**Рис. 5.** Зависимость полного количества циклов (а) и энергии (б) локального вибрационного воздействия, затраченных на инициацию динамического проскальзывания активного блока, от частоты  $\nu/\nu_H^{\parallel}$  при  $P_{\max}=490$  МПа и  $F_x/P_{\max}$ : 1) 0,66; 2) 0,76; 3) 0,82

На рис. 6 приведены зависимости  $N_{total}$  и  $E_{total}$  от амплитуды «вибрационного» давления  $P_{\max}$  для различных напряженных состояний модельной границы. Видно, что с увеличением  $P_{\max}$  количество циклов, необходимых для инициации неустойчивой

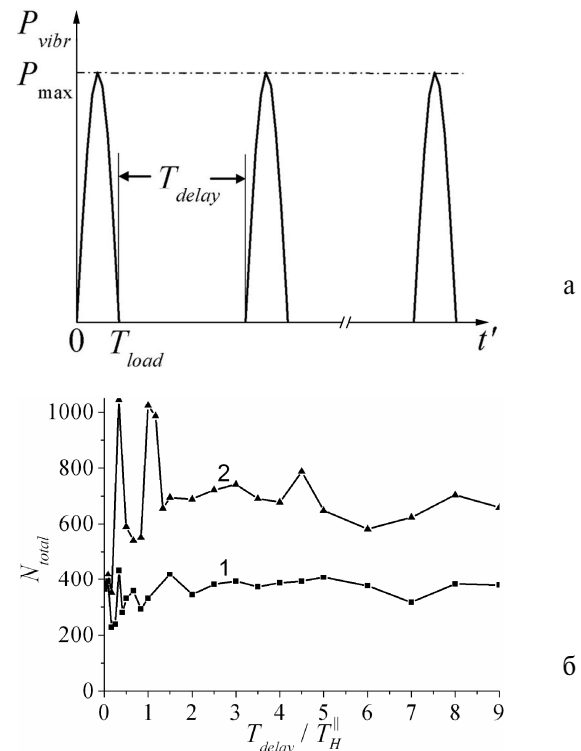
подвижки, убывает обратно пропорционально амплитуде. Исключение составляет кривая 3, для которой данная зависимость справедлива только при «малых»  $P_{\max}$  ( $P_{\max} < 300$  МПа). Зависимости  $E_{\text{total}}(P_{\max})$  являются возрастающими и могут быть аппроксимированы прямыми линиями (рис. 6, б). Это связано с тем, что энергия одного цикла вибрации  $E_{\text{cycle}}$  пропорциональна  $(P_{\max})^2$ . С учетом того, что  $N_{\text{total}} \sim 1/P_{\max}$  (рис. 6, а), справедливо соотношение  $E_{\text{total}} \sim P_{\max}$ . Таким образом, с уменьшением амплитуды вибраций возрастает число циклов воздействия, но в то же время уменьшается полная величина энергии, затрачиваемой на инициацию неустойчивой подвижки по границе. Это позволяет утверждать, что слабые по мощности, но продолжительные воздействия на высоконапряженные границы раздела в блочных средах в ряде случаев могут оказаться наиболее эффективными (по крайней мере, с точки зрения энергозатрат).



**Рис. 6.** Зависимость полного количества циклов (а) и энергии (б) локального вибрационного воздействия, затраченных на инициацию динамического проскальзывания активного блока, от амплитуды  $P_{\max}$  при  $v=2 \cdot v_H^I$  для  $F_x/P_{\max}$ : 1) 0,66; 2) 0,76; 3) 0,82

Следует отметить, что рассмотренный в настоящей задаче интервал «пиковых» давлений вибрационного источника является достаточно высоким. Так, характерные давления волновых колебаний, составляющих микросейсмический фон в земной коре, на порядки величины ниже. В то же время, давления, достигающие десятков-сотен МПа, имеют место при воздействии на изучаемый фрагмент разрывного нарушения техногенными источниками колебаний, в качестве которых могут выступать скважинные вибраторы [13]. Серии вы-

сокоамплитудных колебаний длительностью до нескольких минут могут также излучаться в очагах сильных землетрясений.



**Рис. 7.** Закон изменения «вибрационного» давления источника при  $T_{\text{load}} \neq T_{\text{delay}}$  (а) и зависимости величины  $N_{\text{total}}$  от отношения  $T_{\text{delay}}/T_H^I$ : 1) 0,25; 2) 0,67.  $F_x/P_{\max}=0,66$ ,  $P_{\max}=490$  МПа

Характер вибраций в реальных средах как естественного, так и искусственного генезиса, зачастую существенно отличается от идеализированного (рис. 2, б). Помимо различий, касающихся формы и повторяемости сигналов, важной особенностью многих излучателей механических колебаний является неравенство времени «импульса» воздействия  $T_{\text{load}}$  и временного интервала  $T_{\text{delay}}$  между воздействиями. При этом отношение  $T_{\text{delay}}/T_{\text{load}}$  может варьироваться в широких пределах. Так, микросейсмический фон представляет собой сложную и нерегулярную последовательность распространяющихся «волновых пакетов» с различными характеристиками, разделенных временными промежутками различной продолжительности. Поэтому в работе исследовался отклик модельной границы раздела (рис. 1) на локальные вибрационные воздействия источника **S**, представляющие собой серии «импульсов» синусоидальной формы с заданной скважностью (определяемой отношением  $T_{\text{delay}}/T_{\text{load}}$ ). Схема такого воздействия приведена на рис. 7, а. Анализировалось влияние продолжительности интервалов  $T_{\text{delay}}$  и  $T_{\text{load}}$  на эффективность вибрационного воздействия, определяемую через количество циклов  $N_{\text{total}}$  и энергию  $E_{\text{total}}$ , затраченные на инициацию неустойчивой подвижки верхнего блока. Результаты расчетов, в частности, показали, что значительные колебания величины  $N_{\text{total}}$  происходят в узком диапазоне  $T_{\text{delay}} < 2 \cdot T_H^I$  ( $T_H^I=1/v_H^I$ ). При этом ам-

плитуда таких колебаний может достигать 50 % от среднего значения и более (рис. 7). С увеличением  $T_{delay}$  величина  $N_{total}$  «стабилизируется», и при  $T_{delay} \gg T_H^I$  становится практически постоянной (рис. 7). Отметим, что поскольку энергия одного импульса воздействия почти не зависит от  $T_{delay}$ , то зависимость  $E_{total}(T_{delay})$  повторяет приведенную на рис. 7.

Изменение продолжительности импульса воздействия (величины  $T_{load}$ ), не приводит к качественному изменению описанных закономерностей, однако может сопровождаться заметным изменением количества циклов, необходимых для инициации неустойчивой подвижки (кривые 1 и 2). Заметим, что зависимость «установившегося» значения  $N_{total}$  (соответствующего условиям  $T_{delay} \gg T_H^I$  и  $T_{delay} \gg T_{load}$ ) от продолжительности импульса  $T_{load}$  подчиняется приведенному на рис. 5 закону  $N_{total}(v)$ , если положить  $T_{load} = T/2 = 1/2v$  и учесть отсутствие зависимости  $N_{total}$  от скважности импульсов. Причиной снижения эффективности вибрационного воздействия (выражаемого, в частности, в терминах  $N_{total}$  и  $E_{total}$ ) при возрастании  $T_{load}$  является уменьшение скорости выделения энергии источником.

Таким образом, эффективность локальных вибрационных воздействий на границу раздела, находящуюся в нагруженном состоянии, определяется, главным образом, временем выделения энергии в

ходе одного цикла воздействия и практически не зависит от скважности.

### Заключение

Проведенное в работе на основе компьютерного моделирования методом ПКА изучение закономерностей инициации локальными вибрационными воздействиями относительных смещений модельных блоков по границе раздела, находящейся в нагруженном состоянии, позволило выявить их общность с конечными стадиями подготовки сильных землетрясений, механизм которых связан с относительным сдвиговым смещением структурных блоков земной коры. Анализ полученных результатов показал, что эффективность подобных точечных источников вибрации определяется, главным образом, относительной величиной сдвиговых напряжений и частотой воздействия (или временем выделения энергии импульса) и практически не зависит от скважности. При этом, продолжительные по времени воздействия с относительно малыми амплитудами на высоконапряженные границы раздела в блочных средах являются наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат.

*Работа выполнена в рамках интеграционных проектов СО РАН № 27 и № 87, проекта № 3 программы Президиума РАН № 16, а также при поддержке гранта РФФИ (№ 06-05-64792-а).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 423 с.
2. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. — 301 с.
3. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 1. — С. 5–14.
4. Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О природе тектонических сил // Доклады АН СССР. — 1988. — Т. 302. — № 2. — С. 304–305.
5. Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механике блочного горного массива // Доклады АН СССР. — 1988. — Т. 302. — № 2. — С. 306–308.
6. Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Шилько Е.В. и др. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физическая мезомеханика. — 2000. — Т. 3. — № 2. — С. 5–13.
7. Psakhie S.G., Horie Y., Ostermeyer G.P. et al. Movable cellular automata method for simulating materials with mesostructure // Theor. and Appl. Fracture Mech. — 2001. — V. 37. — № 1–3. — P. 311–334.
8. Шилько Е.В. Теоретическое изучение поведения интерфейсных сред на различных масштабных уровнях в сложных условиях нагружения // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 3. — С. 93–106.
9. Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // Физическая мезомеханика. — 2003. — Т. 6. — № 1. — С. 41–53.
10. Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. и др. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых повреждений // Физическая мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — № 1. — С. 5–14.
11. Салтыков В.А., Кутаенко Ю.А. Сейсмические затихания перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. — 2000. — № 1. — С. 57–65.
12. Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Юнга С.Л. Сейсмологические аспекты землетрясения на Горном Алтае 27.09.2003, Ms=7.3 (результаты предварительного анализа) [Электронный ресурс] // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о земле РАН». — 2003. — № 1. [http://www.scgis.ru/russian/cpl251/h\\_dgggms/1-2003/scrrep-6.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cpl251/h_dgggms/1-2003/scrrep-6.pdf)
13. Астафуров С.В., Шилько Е.В., Димаки А.В. и др. Изучение особенностей отклика границ раздела в разломно-блоковых средах на изменение их состояния и динамические воздействия. Ч. 2. Результаты компьютерного моделирования // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 6. — С. 33–39.

Поступила 26.10.2006 г.